

Ilościowe oznaczanie szybkości wycieku (LRQ) przy użyciu kamer dźwiękowych

Tolos Senan,

Dr inż. ds. badań w zakresie akustyki

Wprowadzenie

W wielu sytuacjach występuje konieczność wykrywania wycieków. Do najczęstszych przypadków należą systemy sprężonego powietrza obecne w wielu zastosowaniach i powszechnie wykorzystywane w zakładach produkcyjnych.

Przypomnienie działania przyrządu ii900/ii910

W przyrządzie ii900/ii910 zastosowano 64 mikrofony rozmieszczone w ramach określonej matrycy. W środku matrycy znajduje się kamera wizyjna, która zapewnia obraz sceny. Przyrząd wykorzystuje złożone algorytmy do generowania mapy dźwiękowej lub obrazu źródeł dźwięku, a następnie nakłada wygenerowaną mapę dźwiękową na obraz. W zależności od położenia źródła dźwięku w polu widzenia przyrządu ii900/ii910, dźwięk dociera do każdego z mikrofonów w nieco innym czasie. Różnice między czasami docierania dźwięku do poszczególnych mikrofonów umożliwiają ustalenie położenia źródła dźwięku: jeśli dźwięk dobiega z prawej strony przyrządu, mikrofony po prawej stronie macierzy odbierają dźwięk o ułamek sekundy wcześniej niż mikrofony po lewej. Przyrząd ii900/ii910 wyświetla obraz dla tego dźwięku po prawej stronie ekranu.

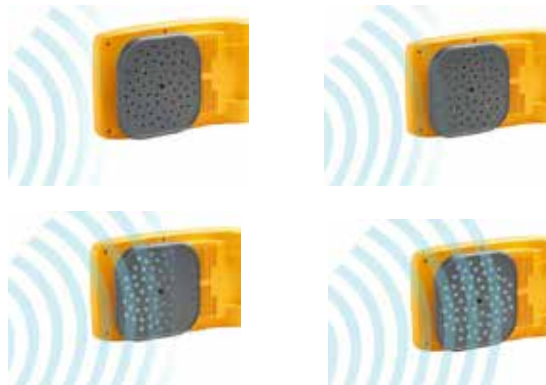
W jaki sposób przyrząd ii900/ii910 wykrywa wycieki?

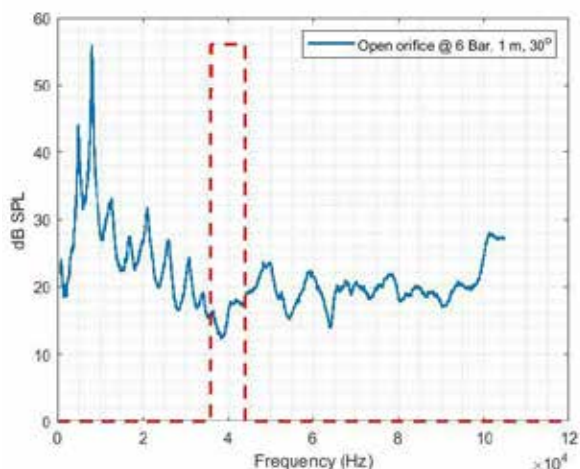
Kiedy w układzie pod ciśnieniem pojawia się wyciek, cząsteczki ulatniającego się gazu (powietrza) powodują turbulencje, co z kolei wywołuje szybkie zmiany ciśnienia i prędkości przepływu. Zmiany te mogą być transmitowane w postaci fal dźwiękowych. Przyrząd ii900/ii910 jest w stanie wykryć lokalizację i intensywność tych fal dźwiękowych.

Sprężone powietrze wyciekające do otoczenia powoduje szum szerokopasmowy zarówno w zakresie częstotliwości słyszalnej, jak i ultradźwiękowej (Eret i Meskell, 2012; Holstein i in., 2016). W przemysłowych systemach sprężonego powietrza wąskopasmowe czujniki ultradźwiękowe (pasmo w sąsiedztwie częstotliwości 40 kHz) są powszechnie stosowanym przyrządem do lokalizacji wycieków. Jednak użycie wąskopasmowego czujnika ultradźwiękowego ma pewne ograniczenia.

Odległość pomiędzy wyciekami a przyrządem pomiarowym oraz kąt pomiaru są podstawowymi czynnikami, które mają wpływ na skuteczność czujników ultradźwiękowych: Po pierwsze, dźwięk o wysokiej częstotliwości jest pochłaniany przez atmosferę i szybko tłumiony (patrz Wolstencroft i Neale, 2008).

Po drugie, poziom ciśnienia akustycznego generowany przez wyciek sprężonego powietrza zmienia się w zależności od kąta pomiaru (Wolstencroft i Neale, 2008). Ponadto wiemy, że hałaśliwe otoczenie obniża skuteczność wąskopasmowych czujników ultradźwiękowych (Eret i Meskell, 2012). Dzięki wykorzystaniu czujników szerokopasmowych, które działają zarówno w zakresie częstotliwości słyszalnych, jak i ultradźwiękowych, użytkownik może skompensować wymienione powyżej ograniczenia. Ta elastyczność w zakresie częstotliwości zwiększa stabilność układu wykrywania wycieków. Na przykład na rysunku 1 pokazano, że sprężone powietrze wyciekające z otworu w układzie pod ciśnieniem 6 barów generuje dźwięk szerokopasmowy. Z rysunku 1 wynika, że strefa częstotliwości o największym mierzalnym poziomie ciśnienia akustycznego znajduje się w zakresie słyszalnym. Natomiast poziom ciśnienia akustycznego mierzony w zakresie częstotliwości 35–45 kHz (czerwone linie przerywane na rysunku 1) jest wyraźnie niższy niż w pozostałej części widma częstotliwości.





Rysunek 1: Sprężone powietrze wyciekające przez otwór (1/4 cala). Pomiar jest wykonywany z odległości 1 metra od źródła wycieku przy kącie pomiaru 30 stopni, przyrządem ii910. Niebieska linia pokazuje wygładzone widmo, a czerwona linia przerywana wskazuje strefę częstotliwości około 40 kHz.

Przeprowadzono niewielką liczbę badań, które zajęły się charakterystyką częstotliwości dźwięków podczas wycieku sprężonego powietrza. W badaniu Holstein i in. (2016) przedstawiono widma mierzonych częstotliwości wycieków sprężonego powietrza przy systematycznie zwiększonym natężeniu przepływu (patrz rys. 2 w Holstein i in., 2016). Źródłem wycieku był okrągły otwór, a pomiary wykonano w odległości 20 cm od źródła. Widma częstotliwości pokazują, że im większe jest natężenie przepływu, tym bardziej rośnie energia powyżej 50 kHz. Dla największego przepływu mierzono w tym eksperymencie widmo częstotliwości pokazujące wartość szczytową około 80 kHz.

Czynniki wpływające na wykrywalność wycieków

Czynniki wpływające na wykrywalność wycieków omówiono oddzielnie w niniejszym rozdziale. Należy zauważyć, że czynniki omówione w niniejszej sekcji wzajemnie na siebie wpływają i należy je uważać za pojedyncze elementy szerszego i złożonego zjawiska.

Czynniki określające źródła wycieków:

1. Ciśnienie w układzie

Ogólnie rzecz biorąc, im wyższe ciśnienie w układzie, tym większy wyciek, który prowadzi do większego natężenia dźwięku, a to z kolei ułatwia wykrycie wycieku.

2. Natężenie przepływu

Podobnie jak w przypadku ciśnienia, im większe jest natężenie przepływu w układzie, tym większy wyciek i większe natężenie dźwięku mierzonego w miejscu wycieku. Wyższe natężenie dźwięku ułatwia jego wykrywanie.

3. Rozmiar i kształt otworu

Należy uwzględnić jednocześnie zarówno wielkość, jak i kształt otworu. Jeśli weźmiemy pod uwagę szeroką gamę potencjalnych wycieków powietrza, szybko uznamy, że trudno nam będzie zdefiniować wpływ kształtu i rozmiaru otworu na wykrywanie wycieku. Na tej liście przedstawiono niektóre potencjalne źródła wycieków. Rozmiar i kształt otworu są różne dla każdej pozycji na liście Węże powietrzne i połączenia lub złączki przewodów powietrznych

- Zużyte przyłącza lub przyłącza bez uszczelki o-ring
- Filtry, smarownice i regulatory, jeśli są nieprawidłowo zamontowane
- Otwarte wydmuchy
- Otwarte syfony kondensatu
- Nieszczelne lub wadliwe spusty
- Nieskuteczne lub niskiej jakości kleje do gwintów, lub nieprawidłowo zastosowane kleje do gwintów
- Zawory sterujące i odcinające
- Zużyte uszczelnienia lub uszczelki
 - stare lub źle utrzymane narzędzia pneumatyczne
 - bezczynne lub nieużywane maszyny bądź urządzenia produkcyjne z wlotem powietrza

Gaz	Wzór	Gęstość (kg/m ³)
Acetylen	C ² H ²	1,173
Powietrze	-	1,2929
Amoniak	NH ³	0,7710
Argon	A	1,7837
Dwutlenek węgla	CO ²	1,977
Tlenek węgla	CO	1,250
Chlor	Cl ²	3,214
Etan (10°C)	C ² H ⁶	1,356
Etylen	C ² H ⁴	1,260
Hel	He	0,1785
Wodór	H ²	0,0899
Siarkowodór	H ² S	1,539
Metan	CH ⁴	0,7168
Neon	Ne	0,9003
Tlenek azotu (10°C)	NO	1,34
Azot	N ²	1,2506
Podtlenek azotu	N ² O	1,977
Tlen	O ²	1,429
Propan	C ³ H ⁸	2,9009
Dwutlenek siarki	SO ²	2,927
Para (100°C)	H ² O	0,598
Heksafluorek siarki**	SF ⁶	6,17
Czynnik chłodniczy R134a***	CH ² FCF ³	14,433

Tabela 1: Lista wartości gęstości dla gazów. Gęstość gazu w temperaturze 0°C, 1 ATM*

* Handbook of Chemistry and Physics. 48th ed.

** https://en.wikipedia.org/wiki/Sulfur_hexafluoride

*** https://www.engineeringtoolbox.com/r134a-properties-d_1682.html

Właściwości medium

Właściwości medium wpływają na dźwięk generowany przez wyciek.

4. Gęstość

W poniższej tabeli przedstawiono gęstość gazów w kg/m³ w 0°C i pod ciśnieniem jednej atmosfery. Gęstość gazu ma wpływ na natężenie dźwięku wycieku. Na przykład niska gęstość helu oznacza, że w porównaniu ze sprężonym powietrzem, przy założeniu takiego samego natężenia przepływu i ciśnienia, poziom ciśnienia akustycznego mierzonego w miejscu wycieku będzie niższy. Praktyczne doświadczenia potwierdzają, że wykrywanie wycieków helu jest nie lada wyzwaniem.

5. Lepkość

Lepkość gazu wpływa na poziom ciśnienia akustycznego w miejscu wycieku. Jednak jej wpływ będzie mniejszy niż wpływ gęstości.

6. Temperatura otoczenia

Należy brać pod uwagę temperaturę otoczenia zarówno wokół źródła wycieku, jak i na jego drodze. W przypadku źródła wycieku temperatura otoczenia będzie miała wpływ na gęstość i lepkość. Oba te czynniki powodują zmianę poziomu ciśnienia akustycznego w miejscu wycieku. Wraz ze wzrostem temperatury otoczenia zwiększa się energia kinetyczna cząsteczek, co prowadzi do zwiększenia natężenia dźwięku w miejscu wycieku.

7. Ciśnienie otoczenia

Ciśnienie otoczenia ma bezpośredni wpływ na gęstość gazu. Zmniejszenie ciśnienia otoczenia doprowadzi do zmniejszenia gęstości, co z kolei zmniejszy natężenie dźwięku w miejscu wycieku.

8. Odległość od wycieku do kamery

Odległość pomiaru ma wpływ na mierzony poziom ciśnienia akustycznego. Jeśli dźwięk rozchodzi się od źródła we wszystkich kierunkach, to jego natężenie maleje wraz z odległością.

9. Temperatura otoczenia

Zmiany temperatury otoczenia mogą zmieniać zarówno gęstość gazów, jak i ich lepkość. Obydwa te czynniki wpływają z kolei na szybkość, z jaką dźwięk rozchodzi się w danym medium. Gdy temperatura rośnie, dźwięk rozchodzi się szybciej. Zmiana temperatury otoczenia jest jednym z mechanizmów wpływających na ilość energii akustycznej pochłanianej przez atmosferę. W przypadku niskich częstotliwości i krótkich dystansów wpływ temperatury na pochłanianie dźwięku w powietrzu jest znikomy (Harris, 1966). Jednak w przypadku bardzo wysokich częstotliwości i dużych odległości, poziom ciśnienia akustycznego może ulec znacznemu obniżeniu (Vladišauskas i Jakevičius, 2004).

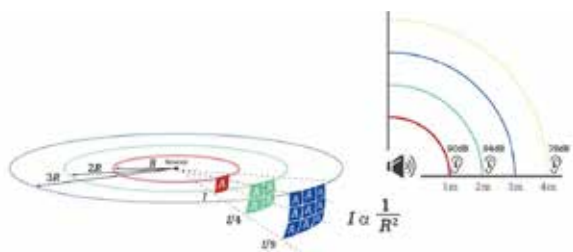
10. Wilgotność

Drugim z mechanizmów wpływających na poziom ciśnienia akustycznego, w związku z jego pochłanianiem w powietrzu, jest wilgotność. Analogicznie jak w przypadku temperatury otoczenia, w normalnych warunkach wpływ wilgotności na poziom ciśnienia akustycznego jest bardzo niewielki (Harris, 1966). Wpływ ten jednak staje się znaczący w przypadku bardzo wysokich częstotliwości i wysokiego poziomu wilgotności (Vladišauskas i Jakevičius, 2004).

11. Ciśnienie otoczenia

Jeśli przyjmie się w przybliżeniu występowanie gazu idealnego, ciśnienie otoczenia nie ma wpływu na poziom ciśnienia akustycznego, ponieważ zarówno gęstość powietrza, jak i ciśnienie gazu mają podobny, ale skierowany przeciwnie wpływ na prędkość dźwięku. Oba czynniki wzajemnie się niwelują. Dlatego też z powodu ciśnienia otoczenia nie należy spodziewać się żadnej różnicy między poziomem ciśnienia akustycznego w miejscu wycieku i w miejscu pomiaru.

Path factors and atmospheric effects



Podwojenie odległości między źródłem dźwięku a pozycją pomiaru w polu swobodnym powoduje zmniejszenie natężenia dźwięku o 6 dB.

Jakie właściwości wycieków potrafi mierzyć przyrząd ii900/ii910?

Przyrząd ii900/ii910 pozwala ustalić typ wycieku i oszacować jego wydatek w oparciu o sygnał akustyczny. W celu opracowania klasyfikacji typów wycieku oraz algorytmów przewidywania wydatku opracowano i przeprowadzono serię badań laboratoryjnych.

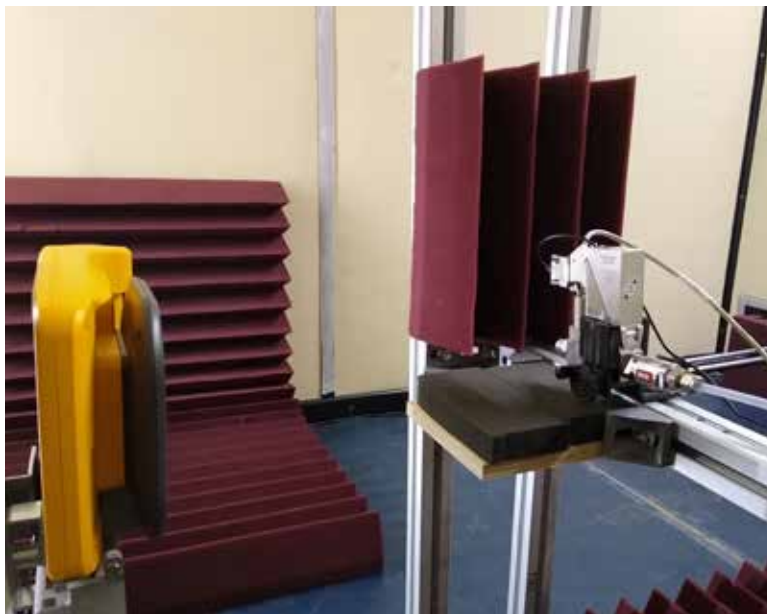
Klasyfikacja typów wycieku w przyrządzie ii900/i910

Przyrządy ii900 i i910 dzielą zarejestrowane dane akustyczne dotyczące wycieków na podstawie ich lokalizacji: Wąż, otwarty koniec, szybkozłącze i złącze gwintowane. Na końcu rurociągu sprężonego powietrza wytworzono cztery klasy, czyli cztery typy wycieków, a pomiary akustyczne przeprowadzono w komorze pół-bezechowej. Na rys. 3 i 4 przedstawiono dwa przykłady konfiguracji badanych układów. Przyłącza generujące cztery typów wycieków wykorzystane w badaniach pokazano na rys. 5.

- 1. Wąż:** Wąż to przewód elastyczny, który umożliwia łatwe wykonywanie przyłączy. Jednak w przeciwieństwie do rury metalowej czy mosiężnej, jest to materiał bardziej wrażliwy. W związku z tym, w węzłach, które łączą sprężarkę powietrza z urządzeniami pneumatycznymi, łatwo mogą pojawić się otwory oraz przecięcia. Do zarejestrowania danych akustycznych wycieku z węża, pod kątem klasyfikacji typu wycieku i przewidywania wydatku, wykorzystano szczelinę naciętą w wężu (rys. 3 i rys. 5a).
- 2. Otwarty koniec:** Rura z otwartym końcem lub otworem to najpowszechniej stosowany w badaniach naukowych (odniesienia) typ wycieku. Ma to miejsce, gdy przewód/rura w jednej z sekcji układu sprężonego powietrza pozostają otwarte. W badaniach w celu klasyfikacji typów wycieku i przewidywania wydatku, na etapie projektowania przyrządu ii900 zastosowano rurę z otwartym końcem (rys. 4 i rys. 5b).
- 3. Szybkozłącze:** Szybkozłącza umożliwiają łatwe i szybkie połączenia przewodów. W skład szybkozłącza wchodzi elementy wewnętrzne, które łatwo można wsunąć w jednym kierunku, natomiast stawiają opór w przeciwnym kierunku. Zwykle co najmniej jeden z tych elementów ulega uszkodzeniu, a sprężone powietrze wycieka przez szybkozłącze. Powietrze rozprasza się wokół złącza, a kierunek wycieku sprężonego powietrza może być różny i zależy od konkretnego uszkodzenia. W badaniach w celu klasyfikacji typów wycieku i przewidywania wydatku, na etapie projektowania przyrządów ii900/ii910 zastosowano odkształcone szybkozłącze (rys. 5c).
- 4. Złącze gwintowane:** W punktach końcowych układu sprężonego powietrza często używa się zaślepek gwintowanej. Zaśleпки gwintowane muszą być starannie umieszczone i mieć prawidłowo dopasowaną liczbę zwojów gwintu, które mają się znaleźć w rurze końcowej. Czasami pracownicy mogą dopuścić do poluzowania tych końcowych zaślepek. Ponadto, w przypadku wielu zastosowań, zaśleпки gwintowane mogą ulec deformacji. W takich przypadkach sprężone powietrze wycieka przez gwintowaną zaślepkę, co ma negatywny wpływ na wydajność układu. W przeprowadzonych badaniach luźno zamontowana zaśleпка gwintowana została użyta jako źródło wycieku (rys. 5d).



Rysunek 3: Pomiar wycieku z węża pod kątem 30 stopni.



Rysunek 4: Konfiguracja próbna pomiaru wycieku przez otwarty koniec pod kątem 90 stopni.



Rysunek 5: Cztery typy przecieków, które poddano badaniom: wąż (a), otwarty koniec (b), szybkozłącze (c) i złącze gwintowane (d).

Wskaźnik ilościowego oznaczania szybkości wycieku (LRQ)

Przyrząd ii900/ii910 umożliwia oszacowanie wydatku w miejscu wycieku w oparciu o zarejestrowane dane akustyczne. Algorytmy wydatku zostały opracowane na podstawie wyników pomiarów laboratoryjnych, przeprowadzonych w komorze pół-bezechowej. Ze względu na różne właściwości akustyczne każdego z typów wycieków, dla każdego typu opracowano jeden algorytm przewidywania wydatku. Dlatego algorytmy przewidywania wydatku mogą zostać użyte po sklasyfikowaniu typu wycieku.

Przewidywany wydatek dla danego typu wycieku jest następnie przekształcany w ilościowy wskaźnik szybkości wycieku (LRQ). Wskaźnik LRQ przyjmuje wartość z zakresu od 0 do 10. Im wyższa wartość LRQ, tym większy jest wydatek w miejscu wycieku i wskaźnik ten można wykorzystać, planując naprawę.

Wnioski

Model ii900/ii910 obsługuje szeroki zakres częstotliwości i jest łatwym w obsłudze ręcznym przyrządem, który pomaga pokonywać trudności przy wykrywaniu oraz ocenie wycieków. Funkcja ustalania wskaźnika LRQ ma kluczowe znaczenie dla utrzymania wydajności układu sprężonego powietrza, a funkcje raportowania zwiększają szybkość komunikacji między członkami zespołu obsługi technicznej.

Źródła

- Eret, P., & Meskell, C. (2012). Microphone arrays as a leakage detection tool in industrial compressed air systems. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2012.
- Harris, C. M. (1966). Absorption of sound in air versus humidity and temperature. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 40(1), 148-159.
- Holstein, P., Barth, M., & Probst, C. (2016). Acoustic methods for leak detection and tightness testing. In *Proceedings, 19th World Conference on Non-Destructive Testing* (s. 13-17).
- Vladišauskas, A., & Jakevičius, L. (2004). Absorption of ultrasonic waves in air. *Ultragarsas*, 50(1), 46-49.
- Wolstencroft, H., & Neale, J. (2008). Characterisation of compressed air leaks using airborne ultrasound. *Proceedings of Acoustics (AAS'08)*.

Fluke. *Keeping your world up and running.*®

Fluke Europe B.V.
P.O. Box 1186
5602 BD Eindhoven
The Netherlands
Tel: +31 4 0267 5406
E-mail cee.cs@fluke.com
www.fluke.pl

©2020-2021 Fluke Corporation. Wszelkie prawa zastrzeżone. Dane mogą ulec zmianie bez uprzedzenia.
06/2021 210581-pl

Modyfikacja niniejszego dokumentu bez pisemnej zgody Fluke Corporation jest zabroniona.